

УДК 621.78

В.В. Крайнов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОРНОВАНИЯ В МЕДНЫХ (ВОЛНОВОДНЫХ) ДЕТАЛЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы технологии производства волноводной техники СВЧ и на основе анализа различных технологий выявлена наиболее эффективная технология дорнования.

Ключевые слова: СВЧ волновод, токонесущая поверхность, шероховатость, дорнование.

В космической технике, радиолокации, медицине и других областях народного хозяйства используется техника СВЧ. Достаточно сложная в конструировании и технологии производства, она содержит различные элементы, которые в изготовлении имеют множество технологических приемов и аспектов для достижения высоких результатов эффективности работы.

Одним из основных элементов конструкции СВЧ является волноводный тракт. Токи СВЧ во время передачи сосредоточены в поверхностных слоях волновода. Собственные потери устройств зависят от глубины проникновения СВЧ-тока, то есть определяются качеством обработки рабочих поверхностей волноводного тракта. В настоящее время существует тенденция к увеличению мощности СВЧ-тока при уменьшении массы изделий и увеличении КПД передающих устройств, поэтому требования к качеству токопроводящей поверхности возрастают.

Волноводы СВЧ представляют собой металлическую трубу. Для крепления сегментов друг с другом и к различным элементам системы СВЧ по краям сегмента расположены фланцы, с помощью которых сегмент достаточно точно ориентируется с другими элементами (см. рис 1).

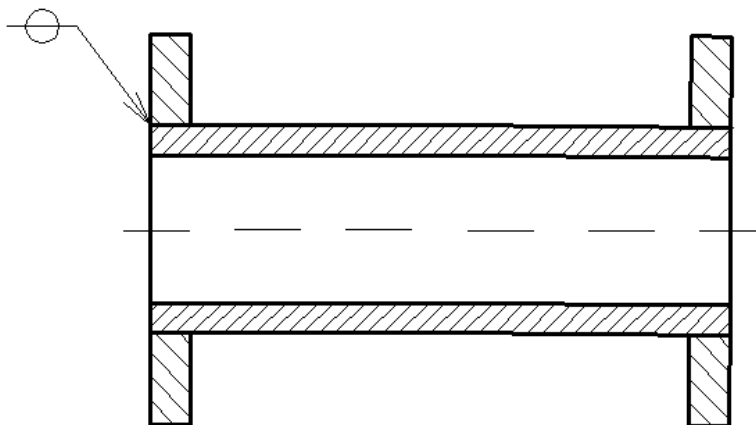


Рис. 1. Общее изображение волновода.

Стрелкой указано место соединения волновода с фланцем (пайка, сварка, накидной фланец и т.д.)

Продольное сечение волноводов также может быть различным в зависимости от назначения волноводного тракта: круглые, прямоугольного сечения, Н- и П-образные. Для малых серий профиль волновода, как правило, круглый, и волноводные секции изготавливаются из пруткового металла подходящего диаметра. Длина секции, как правило, определяется

возможностями инструмента, оборудования и технологии. Основными материалами для волноводов СВЧ являются алюминий, медь и их сплавы. Несмотря на высокие показатели алюминия по стоимости, весу и обрабатываемости, медь можно использовать в вакуумных конструкциях, что ставит ее на уровень универсальных материалов.

Однако у меди имеются и недостатки. Они обусловлены свойствами меди. Удельная проводимость меди весьма чувствительна к наличию примесей. Растворимость кислорода в меди мала, весь содержащийся в меди кислород находится в виде обособленных твердых и хрупких частиц Cu_2O , образующийся оксид меди формирует эвтектику ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зернограничные выделения которой снижают пластичность и деформируемость металла.

Частицы Cu_2O склонны к образованию скоплений, которые приводят к разрушению меди при обработке давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Водород является крайне вредным элементом, его повышенное содержание вызывает так называемую "водородную болезнь". Водород реагирует с оксидами, содержащимися в меди, с образованием водяного пара ($\text{Cu}_2\text{O}+\text{H}_2=\text{H}_2\text{O}+2\text{Cu}$). Под давлением паров воды внутри металла возникают микротрещины, а на поверхности - пузыри от вздутия металла.

Таким образом, все примеси в той или иной степени ухудшают свойства меди. Даже те примеси, которые не ухудшают технологическую пластичность и прочность меди, заметно снижают показатели физических свойств. Большинство примесей ухудшают весь комплекс свойств и в первую очередь характеристики электропроводности. Поэтому для волноводных линий СВЧ для работы в вакууме используют медь с содержанием примесей в сотые доли процента - это так называемая «бескислородная медь» (М00Б).

Как показывает практика, шероховатость рабочей (токонесущей) поверхности также значительно влияет на КПД волноводного элемента: чем выше класс шероховатости, тем ниже коэффициент поглощения и выше КПД.

Для производства волноводов из меди используются различные способы обработки, при которых получается различная шероховатость. В табл. 1 рассмотрены способы обработки медных волноводов, которые при технологических особенностях (различные режимы резания, геометрии инструмента, технологической оснастки) дают сходные классы чистоты.

Таблица 1

Классы чистоты для разных способов обработки медных волноводов

Способ обработки	Класс чистоты с параметрами Ra(мкм)
Литье по выплавляемым моделям	8-7 (0,4-0,8)
Сверление	5-3 (3,2-12,5)
Растачивание	7-5 (0,8-3,2)
Развертывание	7- 6 (0,8-1,6)
Фрезерование	7-4 (0,8-6,3)
Шлифование	9-7 (0,2-0,8)
Протягивание	8-7 (0,4-0,8)
Гальваническая	8-6 (0,4-1,6)
Притирка Полирование	12-10 (0,025-0,1)
Полирование химическое	8-7 (0,4-0,8)
Доработка твердым сплавом (дорнование)	11-9 (0,05-0,2)

В СТП предприятий, изготавливающих волноводную технику, для рабочих (токонесущих) поверхностей волновода чистота поверхности имеет требование по 7-8-му классу.

По сравнению с методом изготовления волноводов из труб, метод литья является наиболее прогрессивным: требует меньших затрат времени и средств, использует недорогие и недефицитные материалы; обеспечивает более высокую стабильность характеристик волноводов за счет их монолитности и идентичности размеров.

Волноводные элементы изготавливаются литьем по выплавляемым моделям и имеют внутренние каналы прямоугольного, эллиптического или круглого сечения и сложной конфигурации. Для изготовления волноводов чаще всего используют сплавы АЛ9 и ЛС59–1Л. Они имеют хорошие литейные и механические свойства, коррозионную стойкость, легко обрабатываются резанием.

Литье по выплавляемым моделям требует изготовления моделей и, таким образом, подразумевает серийное и крупносерийное производство. Изготовление медных волноводов для работы в вакууме методом литья требует использования вакуумных печей для минимизации содержания примесей, что также приводит к значительным тратам.

Внутренняя поверхность полых волноводов должна достигать высокой степени чистоты, поверхностный слой металла должен быть однородным, без разрушений. Это достигается механическими видами обработки: чистовым точением, обработкой алмазным резцом, полированием, суперфинишированием.

Чистовое точение осуществляется с применением резцов из твердых сплавов (ВК-3) при угле $\bar{\alpha}$ -12-15°. Принципиальной особенностью чистового точения являются большие скорости резания (30–50 м/с) при малой глубине резания (0,05–0,1) мм и малой подачи (0,01–0,2 мм/об).

Обработка алмазным резцом следует после чистового точения. Для этого режущим граням алмазного резца придается полукруглый профиль с радиусом кривизны 100–120 мкм. Обточка внутренней поверхности волновода алмазным резцом производится на токарном станке при подаче резца в осевом направлении порядка 0,8–1 мкм на один оборот, скорости резания 17–20 м/с при интенсивном охлаждении струей азота. При таком режиме обработки средняя высота микронеровности составляет не более 0,025-0,005 мкм.

Несмотря на универсальность обработки, расточные резцы имеют ограничения при обработке отверстий малого диаметра, а также при обработке глубоких отверстий с отношением длины обрабатываемой поверхности к диаметру более 10. При растачивании глубоких отверстий происходит отжимание резца от обрабатываемой поверхности, так как оправка резца не имеет достаточной жесткости и точность изготовления цилиндрической поверхности ухудшается.

Достаточной жесткостью для образования цилиндрической поверхности при хорошем ее качестве обладают развертки и протяжки, применяемые на операциях развертывания и протягивания соответственно. Однако мерный инструмент, к которому относятся развертки, прошивки и протяжки, дорог в изготовлении и выгоден при значительной серийности волноводов. Имеются также значительные сложности при обработке входного отверстия волновода, и по этой причине необходимо дополнительное оборудование, использование плавающих патронов.

Притирка, полирование, суперфинишная обработка внутренних волноводных поверхностей и шлифование - достаточно производительные операции, дающие выигрыш во времени по сравнению с лезвийной обработкой. Однако все технологические операции с применением абразива сопровождаются засорением пор поверхности детали зернами абразива, значительно ухудшается качество рабочей поверхности, так как абразив разрушает структуру обрабатываемой поверхности.

Безабразивные полировальные технологии (без внедрения в поверхностный слой других материалов) занимают значительное время и, при хорошем показателе шероховатости, по точности остаются на уровне обработки поверхности предшествующим инструментом (как правило, это растачивание).

При изготовлении единичных образцов сложных по конструкции волноводных звеньев применяется способ электролитического осаждения металла на предварительно изготовленные модели (гальванические операции). По технологическому признаку эти модели разделяют на возвратимые и невозвратимые. Технологический процесс изготовления деталей по возвратным моделям состоит в следующем: на поверхность модели, выполненной из изоляционного материала, сначала наносят тонкий электропроводящий слой (серебро или медь),

после чего загружают в ванну с цианистым электролитом, в котором осаждается слой серебра толщиной 20–40 мкм. Затем медь переносят в ванну из комплексной медно-цианистой соли, где на нее наносят слой меди 2–3 мм и более. Особенностью возвратимых моделей является возможность изготовления по одной модели большого количества изделий.

При рассмотрении методов изготовления волноводов способ электролитического осаждения металла на предварительно изготовленные модели находит постоянное применение, особенно при покрытии рабочей поверхности волновода драгоценными металлами (золото и серебро), что позволяет иметь низкое удельное сопротивление у токонесущей поверхности, низкие потери на отражение и защитную пленку от окисления основного материала.

Однако предлагаемые операции из-за использование драгоценных материалов достаточно дороги. Покрытие моделей медью дает неоднозначное решение. И главное противоречие заключается в том, что при гальванических операциях происходит внедрение в материал волновода кислорода, что в дальнейшем вызывает «водородную болезнь», поэтому для вакуумных систем, гальванические технологии фактически не приемлемы.

Химическое полирование имеет хорошие показатели по шероховатости поверхности, минимальным затратам времени на обработку и поэтому широко используется для изготовления волноводных поверхностей. Электрохимическое анодирование производят в 20%-ном растворе серной кислоты, детали присоединяют к аноду, катодом служит свинцовая пластина. Однако, эта обработка используется как дополнение к качественной предыдущей обработке, так как может только на один класс повысить шероховатость поверхности. В остальном она полностью копирует форму предыдущей поверхности.

Доработка твердым сплавом или дорнование (деформирующее протягивание, прошивание) состоит в холодном пластическом деформировании заготовки при поступательном перемещении через отверстие с некоторым натягом специального инструмента. При этом обеспечивается повышение точности отверстий, интенсивное сглаживание микронеровностей и упрочнение поверхностного слоя. После дорнования на оптимальном режиме в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения. В качестве инструмента при дорновании используют стальные и твердосплавные шары, однозубые и многозубые прошивки и протяжки, 1-2 зубые дорны. Рабочая часть зубьев прошивок и протяжек, в большинстве случаев, оформляется в виде двух усеченных конусов, соединенных цилиндрической ленточкой. Оптимальные значения углов конусов составляют $6...10^\circ$, ширина цилиндрической ленточки – 0,1...3 мм.

В целом, дорнование позволяет обеспечить высокую точность отверстий (до IT6...IT7), получить очень малую шероховатость поверхности (до Ra 0,05...0,1 мкм), значительно упрочнить поверхностный слой (рост микротвердости достигает 130...260%), создать в этом слое сжимающие остаточные напряжения, наибольшая величина которых близка к пределу текучести материала заготовки. Это упрочнение поверхностного слоя уплотняет металл, приводит к разрушению изолирующих межкристаллитных пленок, что приводит к уменьшению удельного сопротивления.

Однако как протяжки, так и прошивки, для единичного и мелкосерийного производства экономически не приемлемы. Именно единичное и мелкосерийное производство позволяет из огромного разнообразия ограничиться: стальными шарами, протяжными пульками и простыми 1-2-зубыми дорнами, так как материал волноводов медь, то для дорна используются недорогие стали: сталь 40 и аналогичные, с возможностью закалки или подкалки, или просто, без термообработки, в зависимости от необходимой чистоты обрабатываемой поверхности.

Важное влияние на процесс дорнования оказывает применяемый смазочный материал, устраняющий схватывание инструмента с заготовкой и обеспечивающий снижение деформирующего усилия, повышение точности и качества поверхности. При дорновании медных заготовок под волноводы любая масляная или жировая смазка запрещена, так как частицы масла или жира после дорнования внедряются в микропоры и значительно увеличат коэффи-

циент поглощения волн СВЧ. Такую поверхность использовать в вакууме вообще не представляется возможным.

Дальнейшая попытка промыть поверхность с помощью химических растворителей приводит к снижению качества поверхности. По этой причине дорнование медных заготовок под волноводы происходит при помощи спирта.

Выводы

Большинство способов обработки медных волноводов приходится на серийное производство, требующее применения дорогостоящего оборудования (вакуумную литьевую машину) или дорогостоящего мерного инструмента (развертки, протяжки и прошивки). Способы шлифования, притирка и полирование не применимы для обработки вакуумной меди. Медь требует лезвийную обработку рабочего поверхностного слоя, так как внедренный в рабочую поверхность абразив увеличивает удельное сопротивление металла и уменьшает КПД волновода, а в случае использования вакуумной технологии попавший в поверхность абразив вызывает проблемы с откачкой воздуха и дегазацией поверхности волновода. Из всех рассмотренных методов обработки медных волноводов, в особенности небольших диаметральных размеров, в единичном и мелкосерийном производстве наиболее эффективным следует признать дорнование

Библиографический список

1. **Арзамасов, Б.Н.** Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макаров, Г.Г. Мухин. – 7-е изд. М., 2005.
2. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корецкого, В.В. Пасынкого, Б.М.Киреева. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. **Садако, Г.А.** Гальванопластика / Г.А. Садако. – М.: Машиностроение, 2004.
4. **Скворцов, В.Ф.** Дорнование глубоких отверстий малого диаметра / В.Ф. Скворцов, А.Ю. Арляпов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005.
5. Физическое материаловедение: учебник / под ред. Б.А. Калина. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2014*

V. V. Kraynov

BURNISHING EFFECTIVENESS IN COPPER (WAVEGUIDING) PIECES

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

The aspects of wave guiding microwave technology are considered, different technologies are analyzed, and the most effective burnishing technology is defined on this basis.

Key words: microwave waveguide, current carrying surface, roughness, burnishing.